



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS, E LETRAS -
CCHSTL – CAMPUS AÇAILÂNDIA – MA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO GOMES DUARTE DA SILVA

DETERMINAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS
COM ULTRASSOM: um estudo de caso sobre o impacto de vibrações ferroviárias em
edificações

AÇAILÂNDIA

2026



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

GUSTAVO GOMES DUARTE DA SILVA

**DETERMINAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS
COM ULTRASSOM: UM ESTUDO DE CASO SOBRE O IMPACTO DE VIBRAÇÕES
FERROVIÁRIAS EM EDIFICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
curso de Engenharia Civil da Universidade
Estadual da Região Tocantina do Maranhão, sob a
orientação do Professor Esp. Leonardo Telles de
Souza Pessoa Filho.

AÇAILÂNDIA

2026

S586d

Silva, Gustavo Gomes Duarte da

Determinação e caracterização de manifestações patológicas com ultrassom: um estudo de caso sobre o impacto de vibrações ferroviárias em edificações / Gustavo Gomes Duarte da Silva. – Açailândia: UEMASUL, 2026.
43 f.; il.

Monografia (Curso de Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Açailândia, MA, 2026.

Orientadora: Prof. Esp. Leonardo Talles de Souza Pessoa Filho.

1. Vibrações ferroviárias. 2. Patologias estruturais. 3. Ensaios não destrutivos. 4. Velocidade de pulso ultrassônico. I. Título.

CDU 624



Universidade Estadual
da Região Tocantina
do Maranhão

GUSTAVO GOMES DUARTE DA SILVA

**DETERMINAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS
COM ULTRASSOM: UM ESTUDO DE CASO SOBRE O IMPACTO DE VIBRAÇÕES
FERROVIÁRIAS EM EDIFICAÇÕES**

Artigo apresentado ao Curso de Engenharia Civil
Bacharelado do Centro de Ciências Humanas,
Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade
Estadual da Região Tocantina do Maranhão,
campus Açailândia, como requisito para o grau
de bacharelado em Engenharia Civil.

Aprovado em 11/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



LEONARDO TELLES DE SOUZA PESSOA FILHO

Data: 16/06/2026 11:34:28-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Esp. Leonardo Telles de Souza Pessoa Filho
Especialista em Infraestrutura de Transportes e Rodovias
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Documento assinado digitalmente



DECKSON LACERDA DE SOUSA COSTA

Data: 16/06/2026 14:29:31-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Deckson Larceda de Sousa Costa
Mestre em Ciência dos Materiais
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Documento assinado digitalmente



MÁRIO SILVA DE LUCENA

Data: 16/06/2026 17:46:25-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Esp. Mário Silva de Lucena
Especialista em Pavimentação
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

RESUMO

O transporte ferroviário é essencial para o desenvolvimento econômico, porém o crescimento urbano desordenado próximo às faixas de domínio expõe as edificações adjacentes a níveis de vibração que podem comprometer a sua integridade física. Diante deste cenário, este trabalho teve como objetivo diagnosticar a integridade estrutural e identificar manifestações patológicas em edificações situadas no bairro Vila Ildemar, em Açailândia - MA, decorrentes do impacto das vibrações da Estrada de Ferro Carajás. A pesquisa caracterizou-se como um estudo de caso de abordagem quantitativa e qualitativa, dividindo uma amostra de 33 residências em duas zonas de influência: a Zona 1 e a Zona 2, considerada como área de controle. A metodologia envolveu levantamento de dados construtivos e de percepção de conforto por meio de entrevistas com os moradores, inspeções visuais para mapeamento de danos e a aplicação de ensaios não destrutivos de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 8802:2019. Os resultados revelaram que os imóveis da Zona 1, majoritariamente oriundos de autoconstrução e com ausência parcial ou total de armaduras de aço, apresentaram incidência generalizada de trincas ativas e desagregação. Os ensaios de VPU nesta zona registraram velocidades expressivamente baixas, inferiores a 2000 m/s em diversos pontos, indicando concreto de qualidade ruim a péssima e confirmando a presença de microfissuração interna por fadiga estrutural. Em contraste, as edificações da Zona 2 apresentaram danos mais brandos, como fissuras passivas de retração, e velocidades ultrassônicas mais altas. Conclui-se que o dano estrutural constatado é resultado da interação negativa entre a constante excitação mecânica gerada pelos trens e a vulnerabilidade do padrão construtivo empírico da região. O ensaio de ultrassom validou-se como uma ferramenta eficaz para o diagnóstico precoce, e o estudo recomenda a implementação de soluções de mitigação na via férrea, bem como a adoção de políticas públicas de Assistência Técnica para Habitação de Interesse Social (ATHIS) para garantir reforços estruturais nas áreas afetadas.

Palavras-chave: Vibrações ferroviárias. Patologias estruturais. Ensaios não destrutivos. Velocidade de pulso ultrassônico.



ABSTRACT

Railway transport is essential for economic development, but disorderly urban growth near the right-of-way exposes adjacent buildings to vibration levels that can compromise their physical integrity. Given this scenario, this study aimed to diagnose the structural integrity and identify pathological manifestations in buildings located in the Vila Ildemar neighborhood, in Açailândia - MA, resulting from the impact of vibrations from the Carajás Railway. The research was characterized as a case study with a quantitative and qualitative approach, dividing a sample of 33 residences into two zones of influence: Zone 1 (0 to 250 meters from the railway) and Zone 2, considered a control area (250 to 500 meters). The methodology involved gathering construction and comfort perception data through interviews with residents, visual inspections for damage mapping, and the application of non-destructive Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) tests, following the guidelines of the ABNT NBR 8802:2019 standard. The results revealed that properties in Zone 1, mostly from self-construction and with partial or total absence of steel reinforcement, showed a widespread incidence of active cracks and disintegration. The UPV tests in this zone recorded significantly low velocities, below 2000 m/s in several points, indicating concrete of poor to very poor quality and confirming the presence of internal microcracking due to structural fatigue. In contrast, buildings in Zone 2 presented milder damage, such as passive shrinkage cracks, and higher ultrasonic velocities. It is concluded that the structural damage found is the result of the negative interaction between the constant mechanical excitation generated by the trains and the vulnerability of the region's empirical construction standard. The ultrasound test was validated as an effective tool for early diagnosis, and the study recommends the implementation of mitigation solutions on the railway, as well as the adoption of public policies for Technical Assistance in Social Housing (ATHIS) to ensure structural reinforcements in the affected areas.

Keywords: Railway vibrations. Structural pathologies. Non-destructive testing. Ultrasonic pulse velocity.



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS	8
2.1 Objetivo geral	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
3. METODOLOGIA.....	9
3.1. Estudo de caso	9
3.2. Levantamento de dados sobre os métodos construtivos e Entrevistas	9
3.3. Materiais e Equipamentos.....	11
3.4. Procedimentos experimentais	14
3.5. Tratamento e Análise de dados	16
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
4.1 Dinâmica e Propagação de Vibrações Ferroviárias no Solo	17
4.2 Interação Solo-Estrutura e o Fenômeno da Fadiga	17
4.3 Manifestações Patológicas em Concreto Armado	18
4.4 O Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)	19
4.5 Parâmetros de influência e Interpretação de resultados	19
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
5.1 Caracterização das construções e Percepção da Comunidade	20
5.2 Percepção dos moradores e o Impacto no Conforto Habitacional	21
5.3 Ensaio realizado com o Ultrassom	22
5.4 Correlação: Vibração, Autoconstrução e Degradação	25
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	26
REFERÊNCIAS.....	29
APÊNDICE A – Ficha de Entrevista e Inspeção Preliminar	31
APÊNDICE B – Tabela dos dados extraídos da Ficha de Entrevista e Inspeção Preliminar realizado nas residências	32
APÊNDICE C – Patologias registradas nas inspeções visuais	35
APÊNDICE D – Prints extraídas do Ultrassom PunditLab+ no momento dos ensaios	41

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário é crucial para o crescimento econômico do nosso país por ser um dos principais modos de levar em grande escala tanto a produção agrícola quanto a industrial. Conforme apontam Mesquita *et al.* (2023), a expansão global deste modal se justifica por sua eficiência logística e capacidade de carga, o que tem levado o Brasil a buscar um equilíbrio em sua matriz de transportes. Esse movimento resulta na intensificação do tráfego em linhas novas e existentes, exigindo uma análise de critérios sobre como essa infraestrutura interage com o ambiente construído ao seu redor (Neriyanu, 2017).

Entretanto, o crescimento desordenado das cidades em direção às faixas de domínio ferroviário expõe as edificações a níveis de vibração para os quais muitas não foram projetadas. A propagação dessas ondas pelo solo atinge as fundações das estruturas adjacentes, manifestando-se como ruídos de baixa frequência e vibrações estruturais capazes de comprometer a integridade dos elementos construtivos. Segundo Kuczyński (2018), esses efeitos podem variar desde desconforto aos usuários até danos físicos visíveis, como fissuras e trincas, gerados pela interação dinâmica entre a composição ferroviária e a estrutura da edificação.

Diante desse cenário, surge a necessidade técnica e científica de validação de métodos de inspeção que permitam um diagnóstico preciso sem danificar a estrutura analisada. A relevância do estudo reside na aplicação de Ensaios Não Destrutivos, especificamente o ultrassom, como ferramenta para identificar anomalias internas e superficiais provocadas pelo impacto contínuo das vibrações. Segundo a ABNT NBR 8820:2019, a utilização desta técnica possibilita a antecipação de diagnósticos, evitando intervenções corretivas de alto custo e garantindo a segurança habitacional nas zonas de influência ferroviária.

Este trabalho teve como objetivo diagnosticar a integridade estrutural e caracterizar manifestações patológicas em edificações situadas no bairro Vila Ildemar, em Açailândia, utilizando a técnica de velocidade de pulso ultrassônico. A metodologia adotada constituiu um estudo de caso com abordagem quantitativa, fundamentada nas diretrizes da ABNT NBR 8802:2019, correlacionando a proximidade da fonte vibratória com a degradação da qualidade do concreto.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Diagnosticar a integridade estrutural e identificar manifestações patológicas em edificações por meio de ensaios não destrutivos de ultrassom.

2.2 Objetivos específicos

- Fundamentar teoricamente a correlação entre vibrações ferroviárias e manifestações patológicas em estruturas de concreto, identificando os principais mecanismos de degradação citados na literatura;
- Produzir ensaios não destrutivos com aparelho de ultrassom em estruturas em proximidades variadas das ferrovias para identificação de patologias;
- Exercer levantamento de condições estruturais e avaliação por meio de inspeção visual em estruturas de concreto em proximidades variadas da ferrovia;
- Identificar manifestações patológicas características do impacto das ações dinâmicas resultantes do tráfego ferroviário;
- Propor diretrizes para o monitoramento preventivo e mitigação de danos em edificações situadas na faixa de domínio ferroviário, com base nos diagnósticos obtidos

3. METODOLOGIA

Conforme Prodanov (2013), classifica o estudo como pesquisa aplicada de caráter exploratório e descritivo, utilizando um estudo de caso como base. A metodologia é quantitativa, baseada no número de edificações, na coleta dos dados do ultrassom e nas patologias que forem identificadas.

3.1. Estudo de caso

O estudo de caso é a abordagem mais indicada quando lidamos com perguntas, especialmente em situações em que há pouco controle sobre os eventos e onde o foco são fenômenos atuais (Prodanov, 2013). Sabendo disso, foram realizadas 33 entrevistas, modelo presente no apêndice A, em diferentes edificações no entorno da ferrovia no bairro Vila Ildemar, em Açailândia, de acordo com o interesse dos moradores em participar. A razão para escolher essa localidade é que ela está estrategicamente posicionada na área de influência das vibrações geradas pela ferrovia Carajás, a cerca de 0 a 500 metros de onde essas vibrações se originam. Foram examinados elementos estruturais, como pilares e vigas, além de alvenaria de vedação, que apresentaram sinais visíveis de patologias, o que permitiu uma análise comparativa.

Figura 1 – Bairro Vila Ildemar, em Açailândia.



Fonte: Google Earth (2026).

3.2. Levantamento de dados sobre os métodos construtivos e Entrevistas

De forma complementar às análises instrumentais, a metodologia incorporou uma abordagem qualitativa por meio de levantamento de dados junto à comunidade. O objetivo

dessa etapa foi principalmente compreender o histórico construtivo das edificações analisadas e avaliar a percepção dos moradores em relação ao tráfego da Ferrovia Carajás.

A coleta de dados foi realizada por meio de entrevistas com aplicação de questionários estruturados com os moradores dos imóveis selecionados no bairro. O roteiro das perguntas foi direcionado a investigar dois eixos principais: no aspecto construtivo, realizou-se o levantamento do método adotado na edificação, investigando a presença de acompanhamento técnico durante a execução da obra, os tipos de materiais empregados e a utilização de armaduras de aço nos elementos estruturais.

Paralelamente, no que diz respeito à percepção e ao conforto, a pesquisa buscou coletar relatos sobre a influência das vibrações geradas pela passagem das composições ferroviárias. Essa etapa incluiu o registro da frequência dos incômodos, perturbações do sono e ruídos excessivos, além da observação empírica dos moradores quanto ao surgimento e à evolução de trincas e fissuras ao longo do tempo.

Para garantir a ética na pesquisa e a proteção dos participantes, as abordagens foram realizadas mediante a concordância dos moradores, garantindo o anonimato e autorizando a utilização dos dados estruturais e fotográficos das residências para fins estritamente acadêmicos.

Os dados qualitativos obtidos nas entrevistas foram posteriormente cruzados com os resultados dos ensaios de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU).

Figura 2 – Localização demarcada da área onde os ensaios ocorreram no bairro Vila Ildemar, em Açailândia.



Fonte: Google Earth (2026).

3.3. Materiais e Equipamentos

Para a execução das inspeções e dos ensaios de campo, foram empregados recursos técnicos específicos voltados à coleta de dados não destrutivos. O principal instrumento utilizado foi o equipamento de ultrassom PunditLab+, da Proceq (Figura 1), um aparelho portátil desenvolvido para a avaliação de concreto, dotado de transdutores de emissão e recepção que operam em frequências até a 54 kHz, que são utilizadas para ensaios em elementos de concreto armado. Junto do aparelho, um bloco de calibração (Figura 5) foi utilizado para garantir a contundência e a análise fidedigna do ensaio e, complementando, um gel com característica acoplante à base de água (Figura 8) será aplicado, cuja função é assegurar o perfeito acoplamento acústico entre a face dos transdutores e a superfície do elemento estrutural, garantindo a integridade da leitura das ondas.

De forma complementar ao equipamento principal, utilizamos um instrumento de medição e apoio para a preparação e caracterização física dos pontos analisados. Foram utilizados uma trena (Figura 7), lixas (Figura 6) para a regularização prévia da superfície de contato e uma câmera fotográfica para o registro visual das manifestações patológicas encontradas. Por fim, a organização, o detalhamento e o processamento dos dados obtidos serão realizados por meio do próprio software do ultrassom, além das planilhas digitais e editores de texto, Excel e Word.

Figura 3 – Ultrassom Punditlab+ da Proceq.



Fonte: Autor (2026).

Figura 4 – Ultrassom PunditLab+, cabos coaxiais, transdutores e bloco de calibração.



Fonte: Autor (2026).

Figura 5 – Bloco de calibração.



Fonte: Autor (2026).

Figura 6 – Lixa grão 120 para regulação de superfícies.



Fonte: Autor (2026).

Figura 7 – Trena.



Fonte: Autor (2026).

Figura 8– Gel acoplante para meio de contato em transmissão ultrassônica.



Fonte: Autor (2026).

3.4. Procedimentos experimentais

O desenvolvimento da pesquisa seguiu etapas cronológicas e sistemáticas. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica para embasamento teórico sobre dinâmica das estruturas, patologias do concreto armado e o método de ensaio por ultrassom. Segundo Chagas (2023), na fase de campo, iniciamos com a inspeção visual preliminar da edificação, onde foram identificadas, mapeadas e registradas por meio fotográfico as manifestações patológicas visíveis, como trincas, fissuras e desagregações. E com base nesse mapeamento, foram selecionados os pontos estruturais mais críticos, próximos à ferrovia ou com danos visíveis, e os elementos de controle, em sua maioria em zonas pouco afetadas, para a realizar os ensaios.

O ensaio seguiu as recomendações da norma ABNT NBR 8802:2019. Quando os ensaios foram realizados, o aparelho foi calibrado, inicialmente, com o bloco de calibração e verificou se as superfícies do concreto estavam de acordo com a norma.

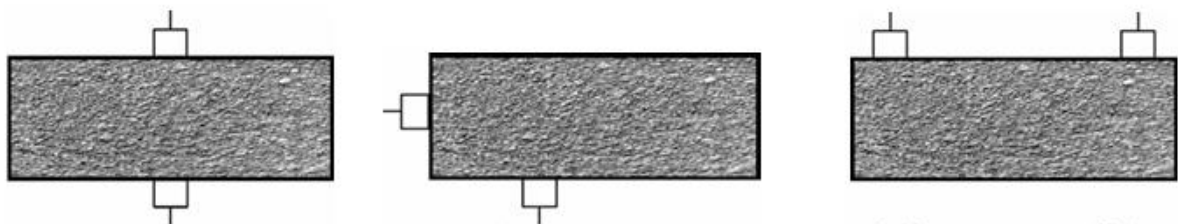
Figura 9 – Calibração dos transdutores com o bloco de calibração.



Fonte: Autor (2026).

Conjunto a isso, foi estipulado uma distância de 1,70m em relação ao solo e a medição. Em seguida, aplicamos uma camada fina de acoplante para garantir o contato e posicionamos os transdutores, que estavam dispostos a 30cm um do outro, de acordo com a necessidade: em faces opostas para transmissão direta, na mesma face para transmissão indireta ou em faces adjacentes para semidireta, como mostra a figura 10. Os ensaios foram feitos em dias secos considerando um fator de correção 1 para concreto seco, que é o valor padrão, considerando o ambiente controlado.

Figura 10 – Transmissão direta, semidireta e indireta, respectivamente.



Fonte: Instruções operacionais – Instrumento ultrassônico (2017).

3.5. Tratamento e Análise de dados

De acordo com a ABNT NBR 8802:2019, os dados coletados em campo do tempo de trânsito da onda em microssegundos, foram processados para o cálculo da Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), por meio da razão referente a distância que percorre pelos transdutores e o tempo medido. A análise dos resultados foi fundamentada na correlação entre três variáveis: a magnitude da velocidade do pulso, que por sua vez é indicativo da qualidade e integridade do concreto; a presença de danos visíveis mapeados e a proximidade do elemento estrutural em relação à fonte de vibração. Foram considerados indicativos de anomalias ou descontinuidades internas, como microfissuras, os pontos que apresentaram quedas significativas na velocidade de propagação em comparação aos pontos de controle ou aos valores de referência normativos.

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

V é a velocidade de propagação da onda, expressa em metros por segundos (m/s).

L é a distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores, expressa em metros (m).

t é o tempo decorrido desde a emissão da onda até sua recepção, expresso em segundos (s).

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Dinâmica e Propagação de Vibrações Ferroviárias no Solo

O progresso da infraestrutura urbana influencia no aumento da carga de vibração que impacta edifícios e construções, acelerando o processo de deterioração física. Os efeitos podem levar a problemas mais sérios ao comprometer a funcionalidade das estruturas. O transporte ferroviário, máquinas com cargas dinâmicas e geradores de turbinas de usinas termelétricas são exemplos de fontes de vibrações de baixa intensidade, com riscos consideráveis a longo prazo. A geração de vibrações ferroviárias se origina primariamente na irregularidade do contato dinâmico entre a roda e o trilho, agravada por descontinuidades na via e pela velocidade da composição (Mesquita *et al.*, 2024).

Essa energia mecânica é transmitida ao solo na forma de ondas de corpo e de superfície (Rayleigh), que se propagam radialmente a partir da fonte. Segundo estudos recentes de Barroso Filho (2020), a intensidade da vibração que realmente chega à fundação de um edifício não é apenas uma questão da carga do trem, mas é muito afetada pelas características geotécnicas do solo onde a construção está. Solos com baixo coeficiente de amortecimento podem facilitar a propagação dessas ondas por distâncias maiores, expondo áreas urbanas que teoricamente estariam fora da zona de influência direta.

O processo de urbanização desordenada em cidades cortadas por ferrovias, como Açailândia, reduz o recuo de segurança necessário para a dissipação dessa energia. Conforme apontam pesquisas sobre o impacto ambiental ferroviário, a densidade urbana aproxima as estruturas das fontes de excitação, ignorando os princípios de atenuação geométrica do solo. Seyedi (2024) destaca que, em edifícios situados a menos de 40 metros da via férrea, a vibração do solo pode excitar os modos naturais de vibração da estrutura, transformando o problema de mero desconforto humano em um problema de integridade física, capaz de gerar danos acumulativos aos elementos estruturais.

4.2 Interação Solo-Estrutura e o Fenômeno da Fadiga

A interação entre as ondas incidentes e a estrutura da edificação é um fenômeno complexo que pode resultar na amplificação dos deslocamentos internos. Segundo Zhang (2023), quando a frequência dominante da vibração do solo coincide ou se aproxima da frequência natural da edificação, ocorre o fenômeno da ressonância, potencializando as tensões nos elementos de concreto. Oliveira (2024) explica, que diferente de um sismo, que é um evento

único e extremo, a vibração ferroviária atua por meio de ciclos de carga repetitivos de baixa a média intensidade. Esse carregamento cíclico induz o fenômeno da fadiga no concreto, onde a resistência do material é degradada progressivamente ao longo do tempo, mesmo sob tensões inferiores à sua carga de ruptura estática.

A fadiga em estruturas adjacentes a ferrovias manifesta-se inicialmente em nível microestrutural. Estudos experimentais recentes mostram que a vibração contínua ajuda a acelerar a junção de microfissuras na área de transição entre a massa de cimento e o agregado. Pesquisas sobre durabilidade de compósitos cimentícios sob cargas dinâmicas sugerem que essa microfissuração reduz a rigidez global da peça e facilita o ingresso de agentes deletérios. Portanto, o dano estrutural neste contexto não deve ser entendido apenas como o colapso iminente, mas como uma perda silenciosa de desempenho e vida útil, exigindo métodos de detecção precoce antes que o dano se torne visualmente aparente (Mehta; Monteiro, 2014).

4.3 Manifestações Patológicas em Concreto Armado

As manifestações patológicas decorrentes de ações dinâmicas são diferentes daquelas causadas por recalques estáticos ou retração térmica. As fissuras induzidas por vibração tendem a ser ativas, ou seja, apresentam movimentação de abertura e fechamento durante a passagem da composição ferroviária. Essa mobilidade impede a cicatrização autógena do concreto e atua como um mecanismo de bombeamento, sugando umidade e agentes agressivos, como cloretos e CO₂, para o interior da peça. Pacheco *et al.* (2024) reforçam que a profundidade dessas fissuras é um indicador crítico da gravidade do dano, pois compromete o cobrimento da armadura, acelerando processos de corrosão que, por sua vez, geram tensões expansivas e mais fissuração.

A classificação correta dessas aberturas é essencial para o diagnóstico. Basicamente, as fissuras, que são pequenas aberturas na superfície, podem se desenvolver em trincas, que são mais profundas e mostram uma ruptura no material. Por fim, elas podem evoluir para rachaduras, onde a capacidade de suportar esforços é comprometida. Em ambientes de alta vibração, a transição entre esses estágios pode ser acelerada. Identificar essas anomalias não pode ficar apenas na inspeção visual, pois a delaminação interna e a perda de aderência entre o aço e o concreto podem acontecer sem sinais externos imediatos. Desse modo, faz sentido usar ensaios não destrutivos que consigam examinar o que está por dentro do elemento estrutural (Silva, 2024).

4.4 O Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)

O ensaio de ultrassom constitui uma das principais ferramentas para a avaliação não destrutiva do concreto, sendo regido no Brasil pela norma ABNT NBR 8802:2019 - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. O princípio físico do método baseia-se na emissão de pulsos de ondas longitudinais (ondas P) através do material. Como a velocidade da onda é função direta da densidade e do módulo de elasticidade dinâmico do meio, qualquer descontinuidade interna — como vazios, fissuras ou segregação de agregados — altera o tempo de trânsito do pulso.

A norma NBR 8802:2019 estabelece critérios rigorosos para a execução do ensaio, definindo três arranjos de transmissão: direta, indireta e semidireta. A transmissão direta, que ocorre quando os transdutores estão colocados em lados opostos do elemento, é vista como a mais eficaz, pelo fato que a onda consegue penetrar por toda a espessura do concreto com a maior energia possível. Por outro lado, a transmissão indireta é usada quando só temos acesso a uma face da estrutura. Isso é bem comum em inspeções de lajes ou paredes de contenção. A correta escolha do arranjo e o uso de acoplante adequado são determinantes para a confiabilidade dos resultados.

4.5 Parâmetros de influência e Interpretação de resultados

A interpretação dos dados de VPU não é linear e exige a consideração de diversos fatores intervenientes descritos na literatura e na normativa técnica. Segundo Lorenzi *et al.* (2024), é importante ressaltar que ter armadura de aço no caminho da onda pode distorcer os resultados, aumentando a velocidade que medimos, já que o som se propaga mais rápido no aço do que no concreto.

Da mesma maneira, a umidade do concreto afeta a medição. Concretos que estão muito úmidos costumam mostrar velocidades mais altas do que os secos, o que pode esconder porosidade que poderia ser detectada. Para correlacionar a velocidade do pulso com a integridade estrutural, utilizam-se faixas de classificação qualitativa. Em geral, velocidades acima de 4500 m/s indicam concreto de excelente qualidade, enquanto valores abaixo de 3000 m/s sugerem concreto de baixa qualidade ou com danos severos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das construções e Percepção da Comunidade

A pesquisa de campo revelou que a vulnerabilidade das edificações na Vila Ildemar transcende a proximidade física com a Ferrovia Carajás, enraizada no padrão construtivo local. O universo amostral de 33 residências foi dividido em duas zonas de influência, permitindo mapear o decaimento da energia vibratória no solo e seus efeitos no ambiente construído. Na Zona 1, compreendida em um raio de 0 até 250 metros da faixa de domínio, identificou-se que todos os imóveis avaliados são fruto de autoconstrução, erguidos sem projeto estrutural ou acompanhamento técnico. O agravante técnico mais severo constatado nesta faixa foi a ausência parcial ou total de armaduras de aço nos elementos estruturais principais.

Sem a capacidade de absorver as tensões de tração geradas pelas cargas dinâmicas cíclicas das composições ferroviárias, essas estruturas tornam-se altamente suscetíveis à fadiga. Os relatos coletados nesta zona indicam um nível de incômodo alto, caracterizado por perturbações do sono e vibrações intensas, perceptíveis em portas, janelas e mobiliários. O cenário contrasta substancialmente com a Zona 2, tida como área de controle, por fazerem parte da distância mais afastada, onde os moradores relataram ausência de vibração tátil, restringindo o incômodo apenas ao ruído acústico de fundo, como demonstra a tabela 1.

Tabela 1 - Levantamento quantitativo sobre a percepção de impacto por zonas nas edificações.

Zona de influência	Faixa de distância (m)	Quantidade de casas	Padrão Construtivo	Presença de armadura (aço)	Principais Patologias	Nível de incômodo relatado
Zona 1	0 a 250m	23	Autoconstrução e/ou sem responsável técnico	Ausente na maioria e/ou parcial	Fissuras ativas; trincas; armadura exposta; rachaduras; desagregação; deslocamento	vibração intensa em portas/janelas, distúrbio do sono
Zona 2	250 a 500m	10	Autoconstrução e/ou sem responsável técnico	Ausente na maioria e/ou parcial	Fissura passiva; fissuras capilares de retração	incômodo apenas por conta do ruído, mas sem vibrações

Fonte: Autor (2026).

5.2 Percepção dos moradores e o Impacto no Conforto Habitacional

A inspeção visual corroborou os relatos empíricos da comunidade. Nas edificações situadas na Zona 1, foi mapeado uma incidência generalizada de trincas ativas e processos de desagregação do concreto, demonstrado na imagem 8. A tipologia dessas fissuras, muitas vezes com aberturas expressivas e comportamento dinâmico durante a passagem dos trens, é característica de estruturas submetidas a recalques diferenciais induzidos por vibração e perda de suporte do solo, destacado nas respostas do apêndice B.

Imagem 8 – Manifestações patológicas na zona 1.

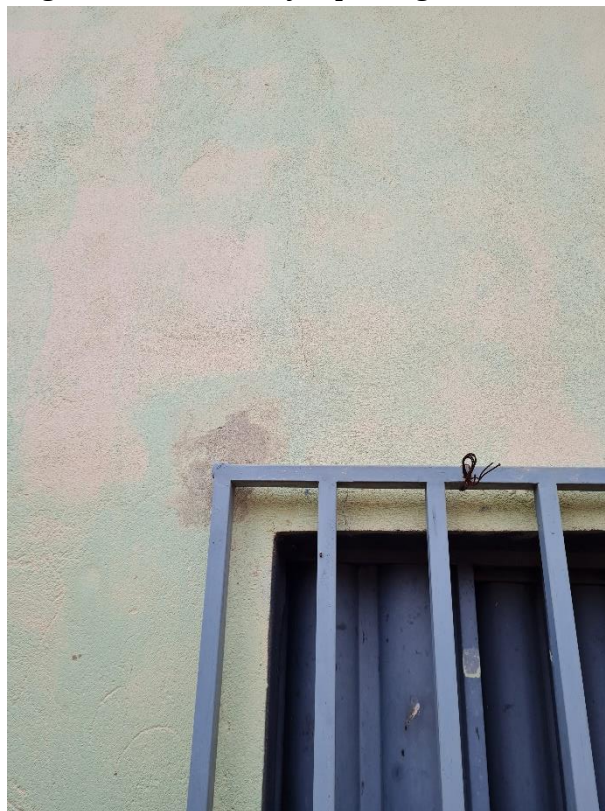


Fonte: Autor (2026).

À medida que o distanciamento da fonte geradora aumenta, se observa uma atenuação geométrica das ondas de superfície. Nas áreas intermediárias (250 a 350m), ou até mesmo na Zona 2, ilustrada pela figura 9, as anomalias evoluem para fissuras passivas e capilares, majoritariamente associadas a efeitos de retração do material cimentício, e não à excitação dinâmica direta. Na zona de controle, as anomalias estruturais graves mostraram-se ausentes, evidenciando a integridade das edificações que não sofrem os efeitos diretos da carga ferroviária, ainda que inseridas no mesmo contexto de autoconstrução. As imagens presentes

no apêndice C detalham as mais diversas patologias encontradas na inspeção visual realizada, corroborando com o que foi detalhado nas entrevistas e nos ensaios.

Figura 9 – Manifestação patológica na zona 2.



Fonte: Autor (2026).

5.3 Ensaios realizados com o Ultrassom

Para relacionar de forma correta as relações das velocidades dentro das estruturas, utilizou-se da tabela criada pelo engenheiro pesquisador E. A. Whitehurst, no trabalho intitulado “The soniscope – a Device for Field Testing of Concrete”, de 1951.

Tabela 2 – Relação entre a Velocidade de Pulso Ultrassônico e a qualidade do concreto.

Velocidade de Propagação da onda ultrassônica no concreto (m/s)	Qualidade do concreto
>4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Regular
2500 a 3000	Ruim
<2000	Péssimo

Fonte: Adaptado de Whitehurst (1951).

Para validar as patologias visuais e os achados relatados nas entrevistas, os elementos foram avaliados por meio de ensaios não destrutivos de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) utilizando configuração de transmissão direta, semidireta e indireta. A análise quantitativa revelou uma clara discrepância no comportamento acústico do concreto atrelada à distância da via férrea, como mostra a tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios utilizando o Ultrassom PunditLab+.

Ponto de inspeção	Zona	Distância da via	Configuração de transmissão	Distância (d) [m]	Tempo (t) [μs]	Velocidade (V) [m/s]	Temperatura do concreto (C°)
Casa 1	Zona 1	0 a 250m	Semidireta	0,30 0,30 0,30	55,4 69,4 116,4	5415 4323 2577	33,7
Casa 2	Zona 1	0 a 250m	Indireta	0,25	347,5	719	33,3
Casa 3	Zona 1	0 a 250m	Indireta	0,25	343,5	728	31,2
Casa 4	Zona 1	0 a 250m	Indireta	0,30	840,9	357	31
Casa 5	Zona 1	0 a 250m	Indireta	0,30	77,9	3851	30,5
Casa 6	Zona 1	0 a 250m	Semidireta	0,30	689,4	435	32
Casa 7	Zona 1	0 a 250m	Indireta	0,30	853,4	352	35,7
Casa 8	Zona 1	0 a 250m	Semidireta	0,30	629,1	477	32
Casa 9	Zona 2	250 a 500m	Direta	0,20	35,1	5698	32,5
Casa 10	Zona 2	250 a 500m	Direta	0,30	102	2941	29
Casa 11	Zona 2	250 a 500m	Direta	0,30	104,5	2871	29
Casa 12	Zona 2	250 a 500m	Direta	0,30	98,5	3046	31,2
Casa 13	Zona 2	250 a 500m	Indireta	0,30	108	2778	31,2
Casa 14	Zona 2	250 a 500m	Direta	0,30	136	2206	31,7

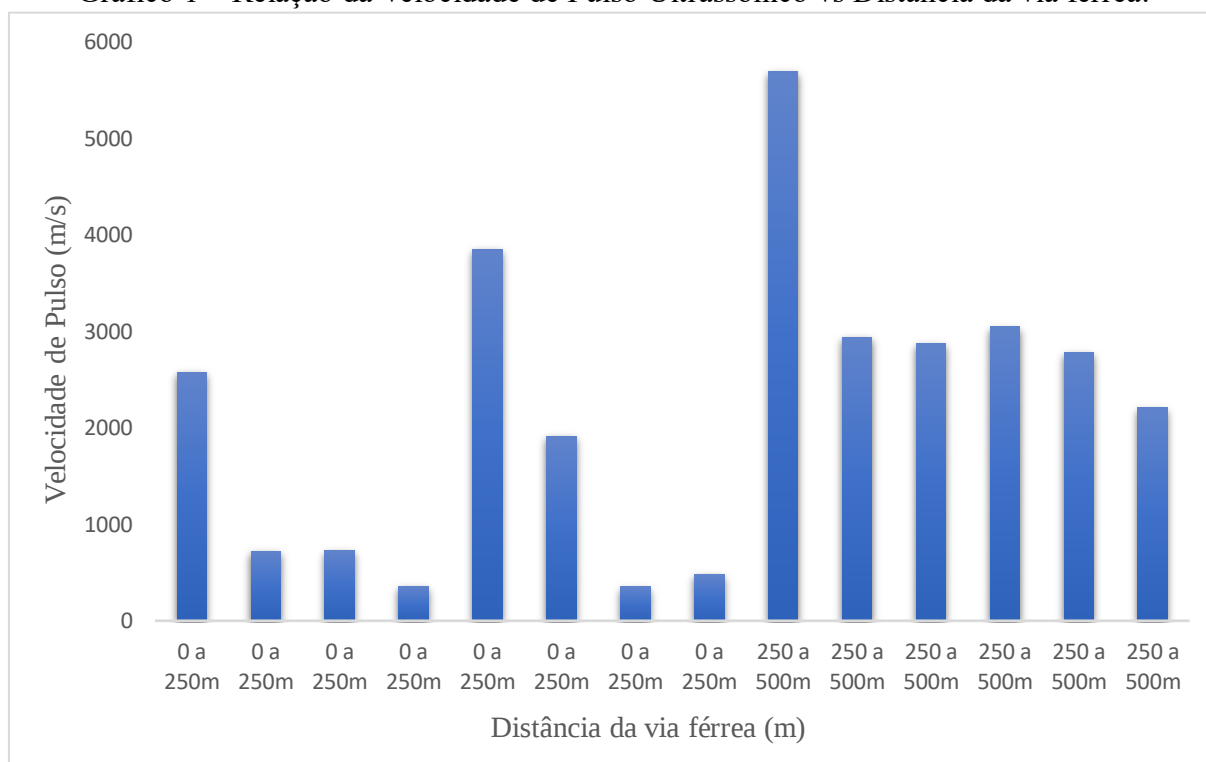
Fonte: Autor (2026).

Isso corrobora com a literatura (LORENZI et al., 2024), que indica que velocidades inferiores a 3000 m/s sugerem alta porosidade e microfissuração, demonstrando assim, o impacto das manifestações patológicas nos elementos analisados. As instruções operacionais

do ultrassom reforçam ainda, que, os vergalhões afetam as medições ultrassônicas, já que o sinal passará mais rapidamente através do vergalhão do que pelo concreto.

Na tabela 3 nota-se alguns casos de que nos ensaios houve essa divergência de valores por conta da presença de armaduras em pontos específicos. Como muitas das edificações não possuem elementos estruturais armados, os ensaios tiveram também, características de verificação da profundidade de fissuras. Por esse motivo, a VPU muita baixa denota tamanho impacto gerado pela repetição das vibrações cíclicas, conforme mostra o gráfico 1.

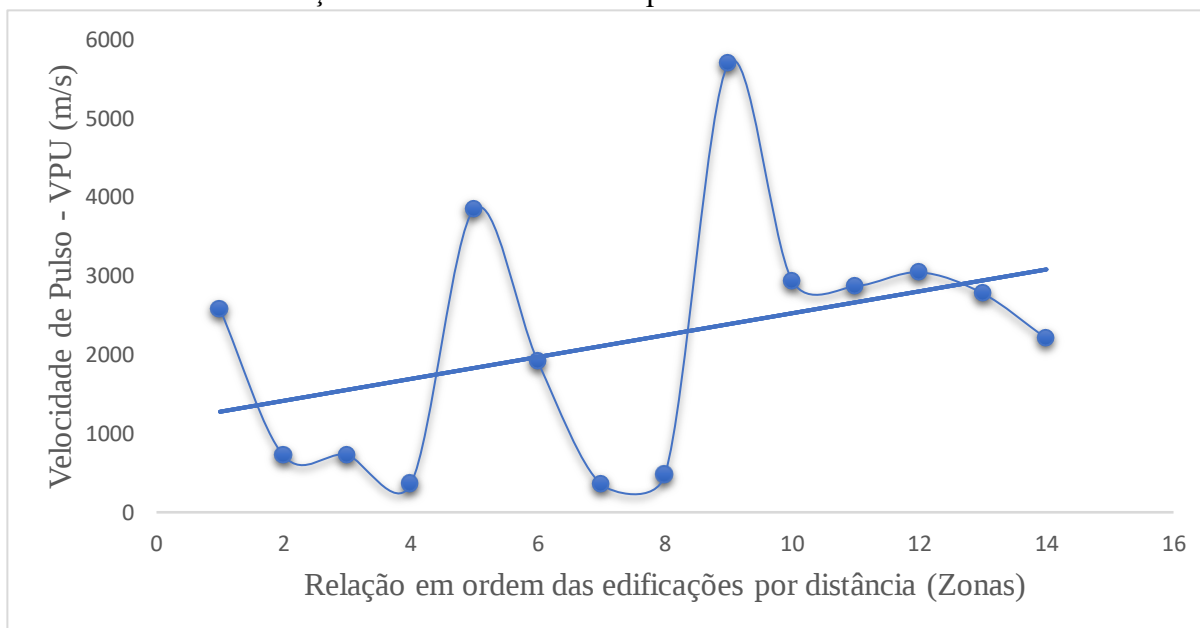
Gráfico 1 – Relação da Velocidade de Pulso Ultrassônico vs Distância da via férrea.



Fonte: Autor (2026).

Para consolidar a avaliação quantitativa da integridade estrutural, os dados de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) obtidos nos ensaios (Tabela 3) foram agrupados e tiveram suas médias calculadas de acordo com a proximidade da fonte geradora de vibração. Conforme ilustra o gráfico 2, observa-se uma queda expressiva na qualidade do concreto nas edificações mais próximas à ferrovia e uma melhora progressiva conforme se afastava da faixa de domínio.

Gráfico 2 – Relação crescente linear do impacto da linha férrea vs distância.



Fonte: Autor (2026).

A zona 1 apresentou uma VPU média significativamente inferior à zona 2, enquadrando-se em grande parte na classificação de concreto ruim a péssimo, segundo os parâmetros de Whitehurst (1951). Esse decaimento acústico e estrutural corrobora com o alto índice de incômodo e a presença de trincas ativas relatados pela comunidade desta faixa, indicada na tabela 1. A sinergia entre a carga dinâmica contínua dos trens e a ausência de armaduras nas autoconstruções atua de forma decisiva para essa degradação acelerada.

5.4 Correlação: Vibração, Autoconstrução e Degradação

A análise conjunta dos relatos sociais, do padrão construtivo empírico e dos dados obtidos nos ensaios não destrutivos de ultrassom permite estabelecer uma correlação direta entre a vulnerabilidade socioeconômica e a degradação estrutural. As edificações da Vila Ildemar sofrem um efeito duplo: a presença constante de impactos causados pela ferrovia e a incapacidade estrutural de resistir a esses esforços devido à ausência de projetos adequados.

Comprovando, portanto, a eficácia do ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) como uma ferramenta de diagnóstico precoce. Em contextos de autoconstrução, onde não há plantas ou histórico estrutural confiável, o uso do ultrassom revelou-se indispensável para mapear o nível de comprometimento interno dos materiais antes que ocorram falhas generalizadas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste estudo de caso permitiu diagnosticar com precisão a integridade das estruturas residenciais no bairro Vila Ildemar, cumprindo o objetivo geral de correlacionar os danos físicos encontrados com as ações dinâmicas decorrentes da atividade ferroviária local. A fundamentação teórica e a coleta de dados demonstraram que as vibrações constantes emitidas pelo solo provocam o fenômeno da fadiga mecânica nos componentes de concreto e alvenaria.

Entretanto, a principal contribuição desse estudo está na descoberta de que o dano estrutural não é determinado apenas pela magnitude da carga dos trens, mas pela interação negativa entre a excitação dinâmica e a vulnerabilidade construtiva da região. As entrevistas e inspeções visuais mostraram que a autoconstrução empírica, a falta de projetos e, principalmente, a ausência de armaduras de aço nas fundações e pilares comprometem a habilidade das estruturas de suportar os esforços de tração e cisalhamento causados pelas ondas de superfície. Os ensaios não destrutivos de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) forneceram a validação científica necessária para o diagnóstico.

O nítido contraste entre os baixos índices de velocidade registrados nas proximidades da via inferiores a 2000 m/s e os índices saudáveis obtidos na área de controle superiores a 3000 m/s quantificou a perda silenciosa de rigidez e o surgimento de microfissuras internas nas zonas de impacto direto. Paralelamente, os relatos sobre perturbação do sono, ruídos e tremores em componentes secundários evidenciaram que o problema transcende a segurança estrutural, afetando drasticamente o conforto ambiental e a qualidade de vida da população.

Diante dos danos identificados e das dificuldades financeiras enfrentadas pelos moradores para realizar reformas complexas, a redução dos impactos deve ser tratada por meio de esforços conjuntos entre a concessionária ferroviária e as autoridades públicas. No contexto da infraestrutura ferroviária, a instalação de barreiras de onda no solo, seja por meio de trincheiras abertas ou preenchidas com materiais de menor impedância acústica ao longo da faixa de domínio, é indicada como uma solução técnica eficaz para interceptar e reduzir a propagação das ondas de Rayleigh.

Além disso, ações na superestrutura da via, como o esmerilhamento regular dos trilhos e a colocação de mantas elastoméricas sob o lastro, contribuem diretamente para a diminuição da amplitude das vibrações na fonte geradora. No âmbito do planejamento urbano e

habitacional, é imprescindível a adoção de políticas públicas fundamentadas na Lei Federal nº 11.888/2008 de Assistência Técnica para Habitação de Interesse Social (ATHIS).

Através da engenharia pública gratuita, é possível financiar projetos de reforço estrutural, como o encamisamento de pilares vulneráveis, além de orientar novas construções sobre a obrigatoriedade do uso de armaduras de aço mínimas e taxas de cobertura de acordo com as normas. Para quebrar o ciclo de deterioração mecânica nas áreas afetadas pela ferrovia, essa estratégia social e técnica é essencial.

Para trabalhos futuros, sugere-se a instalação de acelerômetros de campo para medir diretamente a velocidade de vibração de partícula (VVP) no solo e nas fundações locais. Isso permitiria estabelecer curvas de atenuação geométrica mais precisas e subsidiar discussões técnicas sobre o recuo mínimo seguro para o planejamento urbano nas faixas de domínio ferroviário em Açailândia.

AGRADECIMENTOS

A realização desse Trabalho de Conclusão de Curso representa o marco final de uma trajetória de intensos desafios e valiosos aprendizados na Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL). Este trabalho não é fruto de um esforço isolado, mas sim da colaboração de diversas pessoas que contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Expresso minha profunda gratidão a meu orientador, Prof. Leonardo Telles, pela dedicação, paciência e pelos direcionamentos precisos durante toda a pesquisa. Sua orientação foi fundamental para a estruturação da metodologia e para a viabilização das análises com ultrassom.

Um agradecimento especial aos moradores da região da Vila Ildemar. A receptividade, o tempo cedido para as entrevistas e a colaboração de vocês foram peças essenciais para que o levantamento de dados em campo se tornasse realidade.

À Deus por me permitir ter a oportunidade de ter vivido, conhecido, cultivado, cativado, momentos bons e ruins, com saúde, gratidão, incertezas, medos, desconfianças, sorrisos e brincadeiras. Sem o Teu apoio talvez nada disso teria sido possível e eu sou grato por tudo.

As pessoas que ao longo dessa jornada passaram na minha vida e me ajudaram de diferentes formas, seja com um bom dia, com uma palavra de incentivo, com dinheiro, com uma oportunidade, até mesmo com a sua companhia. Meu mais sincero muito obrigado.

Aos meus colegas de curso e amigos, em especial os meus amigos, Walisson e Amailson, que estiveram comigo nessa reta final de curso e abraçaram o meu TCC como se fosse os seus próprios. Agradeço a parceria nas noites de estudo, pelas trocas de ideias e por tornarem o tempo da graduação mais leve. Ao meu amigo Nico, que mesmo de longe e nos momentos próximos, me incentivou, acreditou no meu sonho e sempre comemorou minhas conquistas como se fossem as suas. Ao meu finado e amado Julio César, que nos deixou precocemente, onde quer que esteja, essa conquista é nossa.

Por fim, dedico minha mais sincera gratidão à minha família que de formas diferentes supriram necessidades e preencheram lacunas mesmo sem saber, especialmente a minha avó Terezinha, minha mãe Marta, minha tia Marcela, minha tia Magna e minha irmã Renata, que fizeram do meu sonho, o sonho delas e me alavancaram até esse momento. Obrigado pelo suporte incondicional, pela compreensão nos momentos difíceis e por todo o incentivo que me deu forças para não desistir (mesmo eu tentando todo semestre).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.

BARROSO FILHO, Celso Gabriel; ARAÚJO, Tereza Denyse P. **Estudo analítico sobre velocidade de vibração de solos próximos a linhas ferroviárias**. *Revista Ibero-Americana de Engenharia Mecânica*, v. 2, n. 2, 2020.

CHAGAS, Italo Araújo; SILVA, Walisson Danilo Melo da; SANTOS, Jéssica Almeida dos. **Impacto da atividade ferroviária na integridade estrutural de escolas próximas à linha férrea em Açailândia (MA): uma abordagem com métodos de avaliação não destrutivos**. In: III Semana de Tecnologia e Inovação de Açailândia: conectando ideias e soluções por meio do ecossistema de inovação, 2023, Açailândia. Anais da III Semana de Tecnologia e Inovação de Açailândia: Conectando ideias e soluções por meio do ecossistema de inovação. Açailândia: Even3, 2023.

CONCEIÇÃO, António Costa. **Vibrações em pontes ferroviárias de alta velocidade: método da decomposição da excitação em ressonância**. Mestrado, Instituto Politécnico de Setúbal, Algarve. 2015.

KUCZYŃSKI, Jacek; WACH, Pawel. **Effect of Train vibration on buildings-comparison of the FFT and 1/3 Octave methods**. Svantek, Italia.

LORENZI, Alexandre *et al.* **Ensaaios não destrutivos de ultrassom e esclerometria para estimar a resistência à compressão do concreto**. *Revista Matéria*, 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MESQUITA, Alexandre Luiz Amarante. *et al.* **Vibração ferroviária: causas, efeitos, descritores e ações de mitigação**. *Revista caribeña de las ciencias sociales*, Miami, v.12, n.6, p. 2875-2895. 2023.

MESQUITA, Alexandre Luiz Amarante. *et al.* **Ruído ferroviário: tipos, descritores e método simplificado de previsão**. *Revista DELOS*, Curitiba, v.17, n.62, p. 01-21, 2024.

Neriyanu, R., & Drȳgan, D. (2017). **Estudo dos efeitos negativos dos sistemas de transporte ferroviário sobre a conectividade**. *Instruções*. Advanced Engineering Forum Trans Tech Publ, 1, 94–101.

OLIVEIRA, Gabriel Henrique de. **Estado limite de vibrações excessivas causadas por ações dinâmicas em pavimentos de concreto armado**. 2024. 25 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

PACHECO, A. *et al.* Estimação da profundidade de fissuras em concreto através da velocidade de ondas ultrassônicas. **Revista Matéria**, 2024.

PRODANOV, Cleber Cristiano. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

SEYEDI, Mohsen *et al.* Impact of Train-Induced Vibrations on Residents' Comfort and Structural Damages in Buildings. **Symmetry**, 2024.

SILVA, Eduarda F.; PEDREIRO, Marcelo R. M. Patologia do Concreto: Fissuras. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, São Paulo, v. 10, n. 10, p. 3679–3696, 2024.

SOUSA, M. W. S.; SANTANA, S. H. S. **Análise de Vibrações em uma Estrutura de Concreto: Análise Vibracional de um sistema submetido a um carregamento exponencial**. V Seminário de Iniciação Científica, 2019.

Whitehurst, E. A. **Soniscopes tests concrete structures**. J. Am. Concrete Inst. Proc, 1951.

ZHANG, Y.; LI, Q. **Fatigue damage behavior of concrete under constant amplitude low-cycle loading**. Construction and Building Materials, v. 364, p. 129-142, 2023.

APÊNDICE A – Ficha de Entrevista e Inspeção Preliminar

Figura A1 – Ficha utilizada nas 33 entrevistas que foram feitas.

1. DADOS INICIAIS

1. Data da visita: _____
Exemplo: 7 de janeiro de 2019
2. Endereço: _____
3. Nome do morador/proprietário: _____
4. Distância estimada da ferrovia:
(marque todas que se aplicam)
- ☐ 0 a 250m
- ☐ 250 a 500m
- ☐ 500 a 750m
- ☐ 750 a 1km
5. Há quanto tempo a edificação foi construída? _____

2. ENTREVISTA COM MORADOR/PROPRIETÁRIO

6. Você sente a vibração dos trens passando dentro de casa?
(marque todas que se aplicam)
- ☐ Sim, frequentemente
- ☐ Sim, raramente
- ☐ Não, não sinto nada
7. Como você classificaria o nível de vibração sentido?
(marque todas que se aplicam)
- ☐ Leve (apenas tremores suaves)
- ☐ Médio (vibração de móveis/janelas)
- ☐ Forte (incomoda fisicamente)
8. Você notou o surgimento de trincas ou fissuras nas paredes/pilares após o aumento do tráfego ferroviário?
(marque todas que se aplicam)
- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Não sabe informar
9. A casa já passou por alguma reforma estrutural (reforço de pilares/vigas) recentemente?
Se sim, por qual motivo?
- _____
- _____
- _____

3. MAPEAMENTO VISUAL (PREENCHIMENTO POR PARTE DO PESQUISADOR)

11. Quais manifestações patológicas são visíveis a olho nu? (Pesquisador) (marque todas que se aplicam)
- ☐ Fissuras (pequenas aberturas na superfície)
- ☐ Trincas (mais profundas, rompimento do material)
- ☐ Rachaduras (comprometimento estrutural)
- ☐ Desagregação/Delaminação
12. Registro fotográfico realizado? (Pesquisador)
- ☐ Sim
- ☐ Não
13. As fissuras parecem ativas? (Pesquisador)
- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Não sabe informar

4. PLANEJAMENTO PARA O ENSAIO (PESQUISADOR)

14. Condição da superfície (Pesquisador)
(marque todas que se aplicam)
- ☐ Necessita de regularização/lixamento
- ☐ Superfície adequada
16. Arranjo de transmissão previsto para a coleta (Pesquisador) (marque todas que se aplicam)
- ☐ Diretas (faces opostas)
- ☐ Semi direta (faces adjacentes)
- ☐ Indiretas (mesma face)

Fonte: Autor (2026).

APÊNDICE B – Tabela dos dados extraídos da Ficha de Entrevista e Inspeção Preliminar realizado nas residências

Tabela B1 – Resultado das respostas dos moradores na entrevista.

ID da Casa	Distância da Ferrovia	Sente vibração?	Nível de Vibração	Manifestação patológica? após tráfego?	Fissuras	Trincas	Rachaduras
Casa 01	250 a 500m	Não	Leve	Não	Sim	Não	Não
Casa 02	250 a 500m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Sim	Não
Casa 03	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Sim	Sim
Casa 04	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Não	Não
Casa 05	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Sim	Não
Casa 06	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Não	Não
Casa 07	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Não	Não	Não
Casa 08	0 a 250m	Sim, frequentemente	Leve	Não	Não	Não	Não
Casa 09	250 a 500m	Sim, raramente	Leve	Não	Não	Não	Não
Casa 10	0 a 250m	Sim, frequentemente	Leve	Não	Não	Não	Não
Casa 11	0 a 250m	Sim, frequentemente	Leve	Não	Não	Não	Não
Casa 12	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Não	Não
Casa 13	250 a 500m	Sim, raramente	Leve	Não	Não	Não	Não
Casa 14	250 a 500m	Sim, raramente	Leve	Não	Não	Não	Não

Casa 15	250 a 500m	Sim, frequentemente	Leve	Sim	Não	Não	Não
Casa 16	250 a 500m	Sim, frequentemente	Forte	Sim	Sim	Sim	Não
Casa 17	250 a 500m	Sim, frequentemente	Leve	Sim	Sim	Não	Não
Casa 18	0 a 250m	Sim, frequentemente	Forte	Sim	Sim	Não	Não
Casa 19	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Sim	Não
Casa 20	0 a 250m	Sim, frequentemente	Forte	Sim	Sim	Sim	Não
Casa 21	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Sim	Não
Casa 22	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Sim	Não
Casa 23	0 a 250m	Sim, frequentemente	Leve	Não	Não	Não	Não
Casa 24	0 a 250m	Sim, frequentemente	Leve	Não	Não	Não	Não
Casa 25	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Não	Não	Não
Casa 26	250 a 500m	Sim, frequentemente	Médio	Não	Não	Não	Não
Casa 27	250 a 500m	Sim, frequentemente	Médio	Não	Não	Não	Não
Casa 28	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Não	Não	Não	Não
Casa 29	0 a 250m	Sim, frequentemente	Forte	Não	Não	Não	Não
Casa 30	0 a 250m	Sim, frequentemente	Leve	Não	Não	Não	Não

Casa 31	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Sim	Sim	Não	Não
Casa 32	0 a 250m	Sim, frequentemente	Leve	Não	Não	Não	Não
Casa 33	0 a 250m	Sim, frequentemente	Médio	Não	Não	Não	Não

Fonte: Autor (2026).

APÊNDICE C – Patologias registradas nas inspeções visuais

Imagem C1, C2, C3 e C4 – Manifestações patológicas encontrada na inspeção.



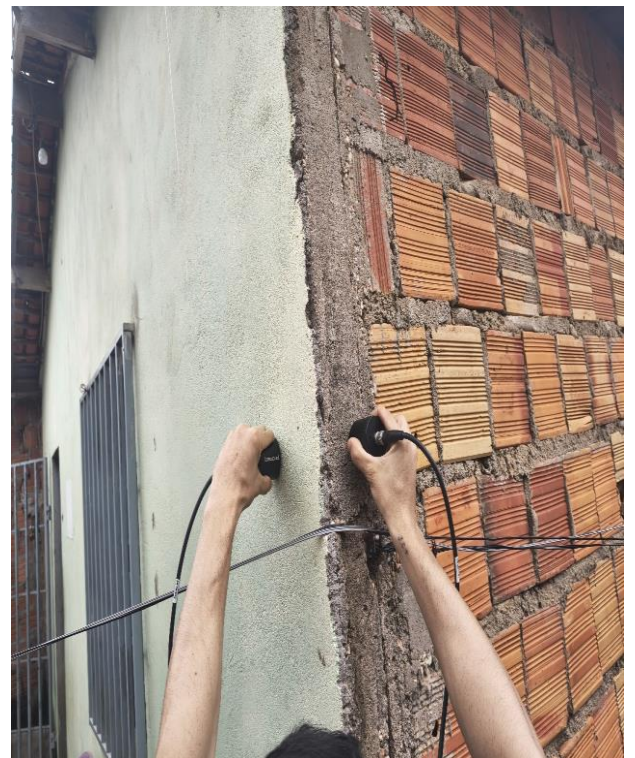
Fonte: Autor (2026).

Imagem C5. C6, C7 e C8 – Manifestações patológicas encontrada na inspeção.



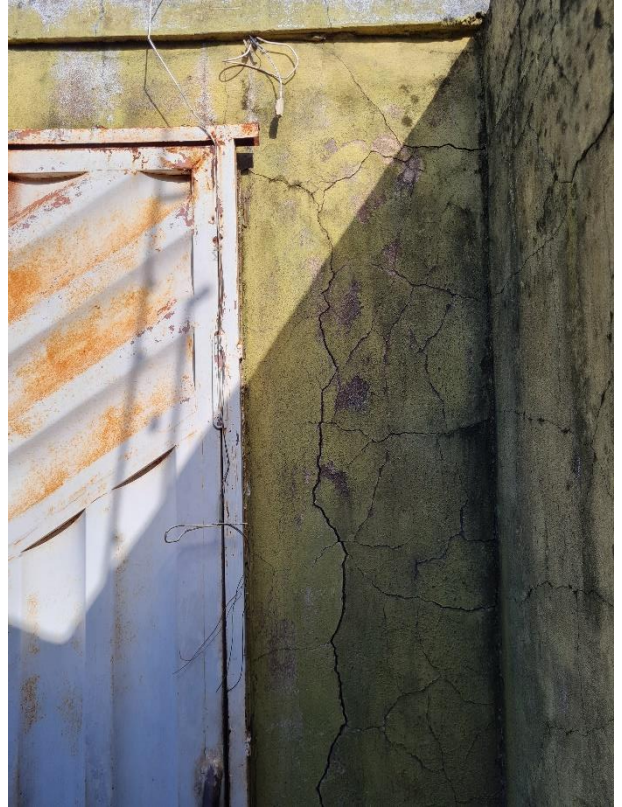
Fonte: Autor (2026).

Imagem C9, C10, C11 e C12 – Manifestações patológicas encontrada na inspeção.



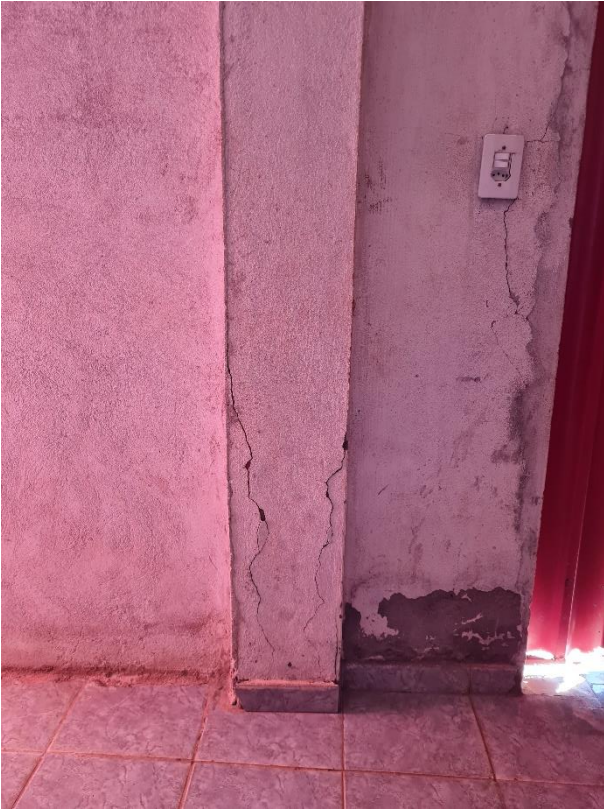
Fonte: Autor (2026).

Imagem C13, C14, C15 e C16 – Manifestações patológicas encontrada na inspeção.



Fonte: Autor (2026).

Imagem C17, C18, C19 e C20 – Manifestações patológicas encontrada na inspeção.



Fonte: Autor (2026).

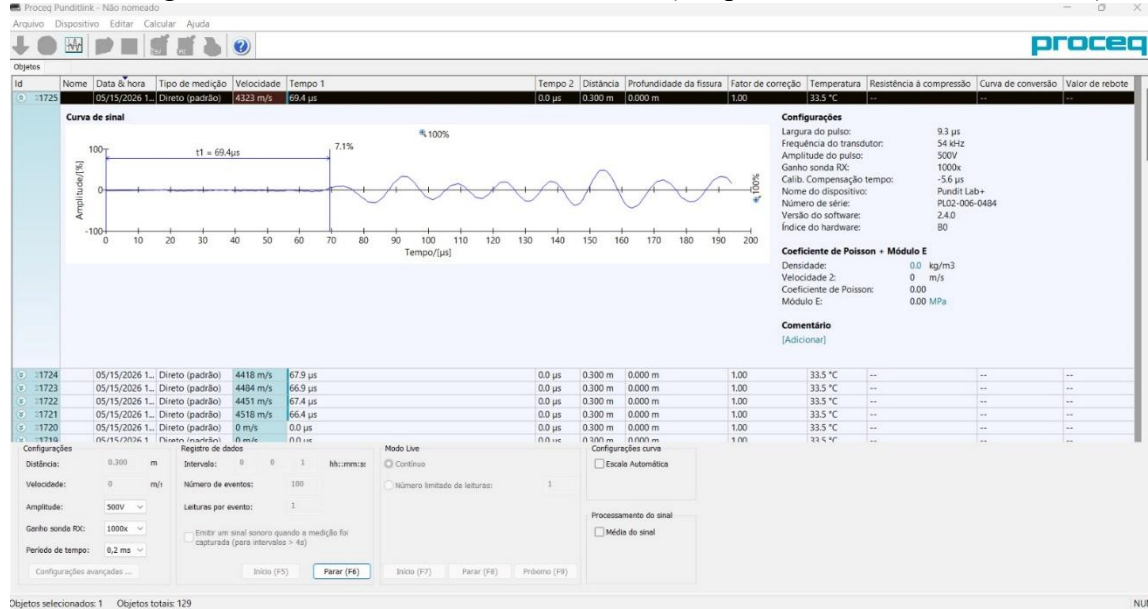
Imagem C21, C22, C23 e C24 – Manifestações patológicas encontrada na inspeção.



Fonte: Autor (2026).

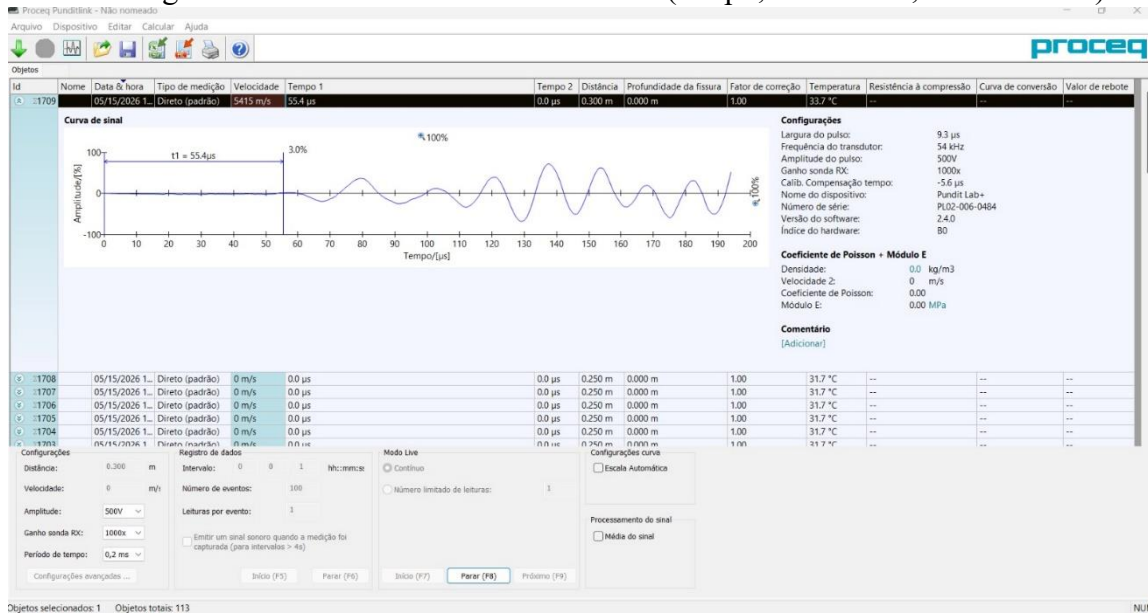
APÊNDICE D – Prints extraídas do Ultrassom PunditLab+ no momento dos ensaios

Imagem D1 – Dados extraídos dos ensaios (tempo, velocidade, distância etc.).



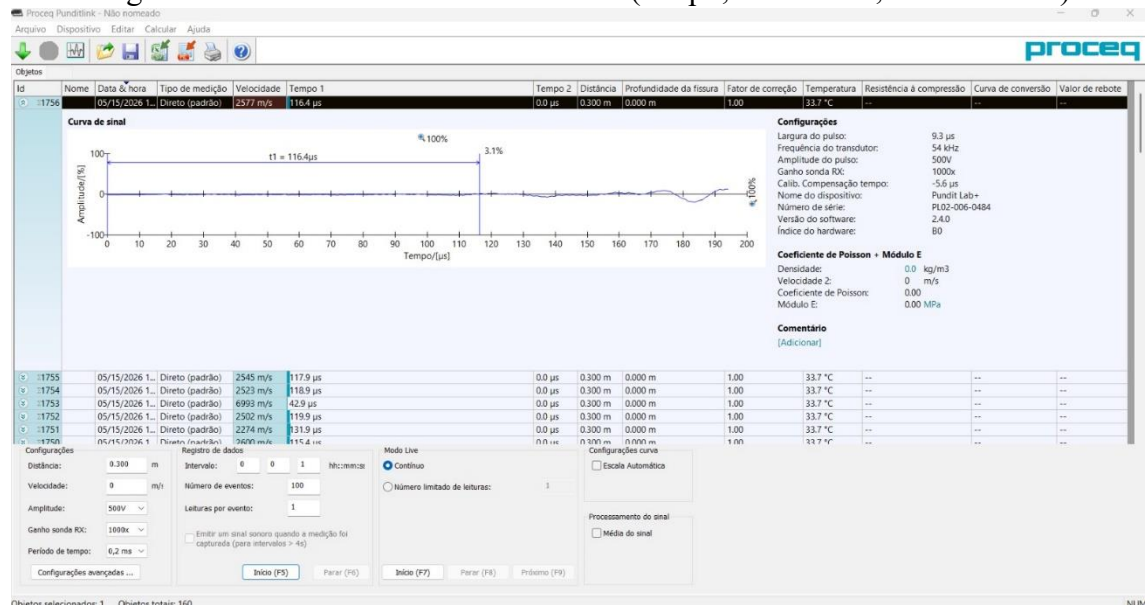
Fonte: Ultrassom PunditLab+ (2026).

Imagem D2 – Dados extraídos dos ensaios (tempo, velocidade, distância etc.).



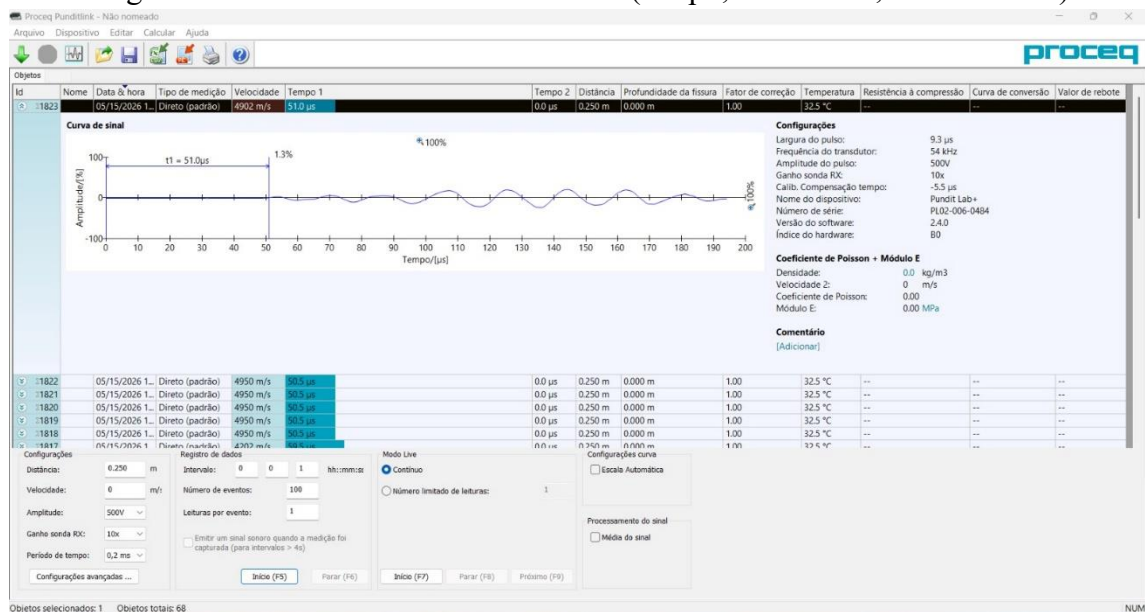
Fonte: Ultrassom PunditLab+ (2026).

Imagem D3 – Dados extraídos dos ensaios (tempo, velocidade, distância etc.).



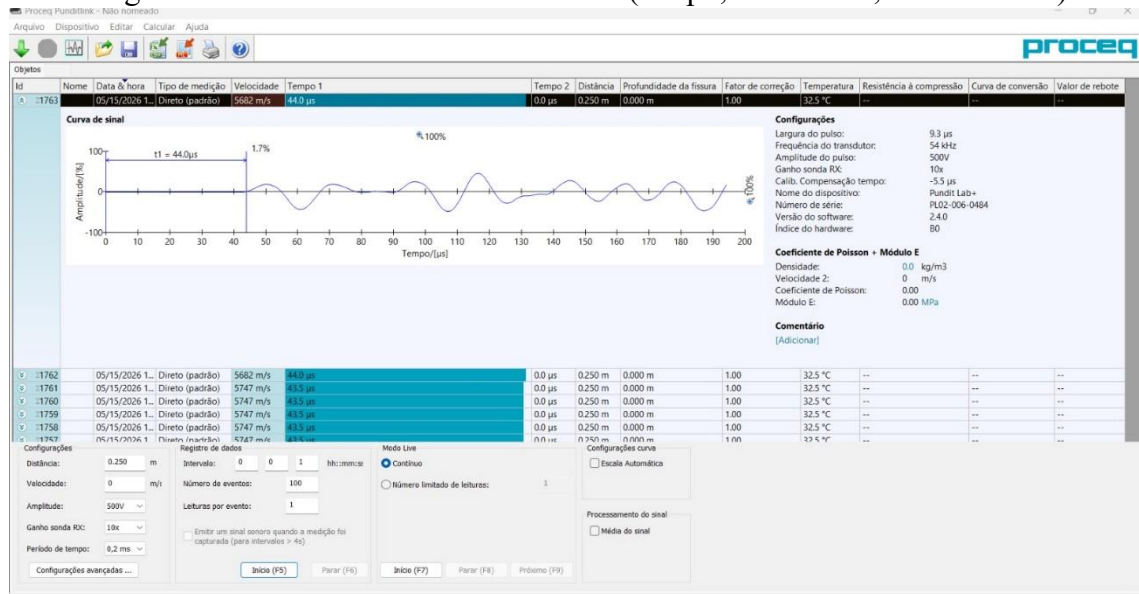
Fonte: Ultrassom PunditLab+ (2026).

Imagem D4 – Dados extraídos dos ensaios (tempo, velocidade, distância etc.).



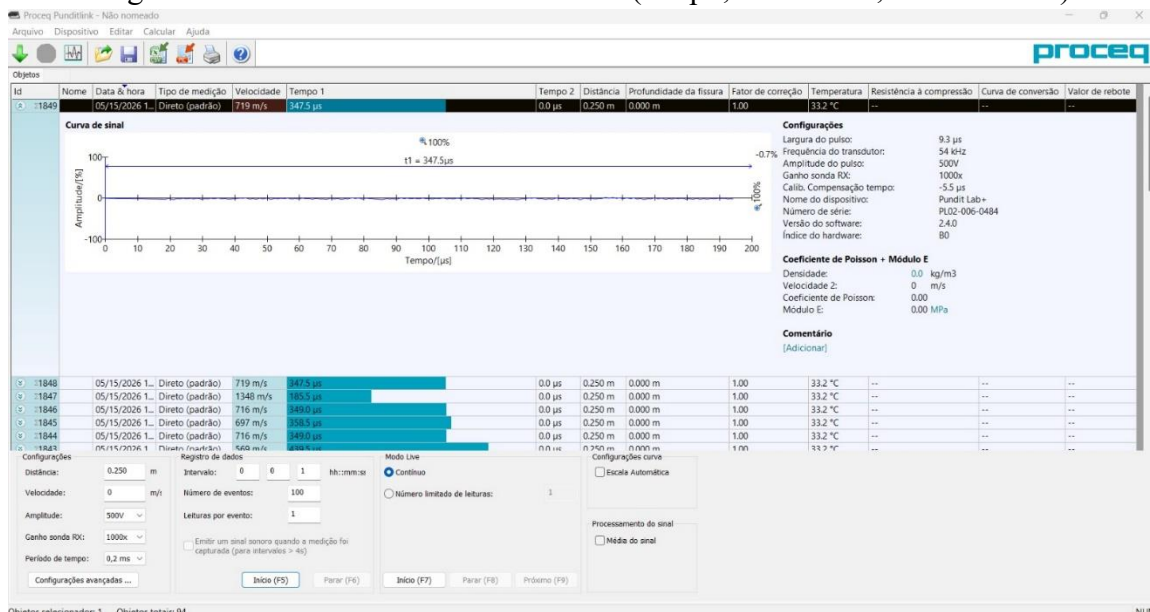
Fonte: Ultrassom PunditLab+ (2026).

Imagem D5 – Dados extraídos dos ensaios (tempo, velocidade, distância etc.).



Fonte: Ultrassom PunditLab+ (2026).

Imagem D6 – Dados extraídos dos ensaios (tempo, velocidade, distância etc.).



Fonte: Ultrassom PunditLab+ (2026).